

学校编码: 10384

分类号\_\_\_\_密级\_\_\_\_

学号: 23320091152808

UDC\_\_\_\_\_

厦门大学

硕 士 学 位 论 文

WCDMA 干扰抵消直放站的研究及其 FPGA 实现

The Research and FPGA Implementation of WCDMA  
Interference Cancellation Repeater

粟仁杰

指导教师姓名: 石江宏 副教授

专 业 名 称: 通信与信息系统

论文提交日期: 2012 年 月

论文答辩时间: 2012 年 月

学位授予日期: 2012 年 月

答辩委员会主席: \_\_\_\_\_

评 阅 人: \_\_\_\_\_

2012 年 月

## 厦门大学学位论文原创性声明

本人呈交的学位论文是本人在导师指导下,独立完成的研究成果。本人在论文写作中参考其他个人或集体已经发表的研究成果,均在文中以适当方式明确标明,并符合法律规范和《厦门大学研究生学术活动规范(试行)》。

另外,该学位论文为( )课题(组)的研究成果,获得( )课题(组)经费或实验室的资助,在( )实验室完成。(请在以上括号内填写课题或课题组负责人或实验室名称,未有此项声明内容的,可以不作特别声明。)

声明人(签名):

年 月 日

## 厦门大学学位论文著作权使用声明

本人同意厦门大学根据《中华人民共和国学位条例暂行实施办法》等规定保留和使用此学位论文，并向主管部门或其指定机构送交学位论文（包括纸质版和电子版），允许学位论文进入厦门大学图书馆及其数据库被查阅、借阅。本人同意厦门大学将学位论文加入全国博士、硕士学位论文共建单位数据库进行检索，将学位论文的标题和摘要汇编出版，采用影印、缩印或者其它方式合理复制学位论文。

本学位论文属于：

（        ） 1.经厦门大学保密委员会审查核定的保密学位论文，  
于        年        月        日解密，解密后适用上述授权。

（        ） 2.不保密，适用上述授权。

（请在以上相应括号内打“√”或填上相应内容。保密学位论文应是已经厦门大学保密委员会审定过的学位论文，未经厦门大学保密委员会审定的学位论文均为公开学位论文。此声明栏不填写的，默认为公开学位论文，均适用上述授权。）

声明人（签名）：

年        月        日

## 摘 要

随着无线通信技术的快速发展,直放站由于其低投入、低成本、较短的建设周期和较好的网络质量等优点,已经被广泛用于无线网络中的扩展覆盖区和填补信号弱区盲区。但直放站应用的一大缺陷是严重的同频干扰,本文将自适应干扰抵消技术应用到 WCDMA 无线直放站,正是为了减小同频干扰造成的自激。

本文首先简单概述了几种常用的自适应干扰抵消算法,并对算法性能进行了 Matlab 仿真,结合算法收敛速率和算法计算复杂度,以及信号实时高速处理的需要,本文选择了 DLMS 算法作为 AIC 直放站的干扰抵消算法。其次详细介绍和仿真了基于 CAZAC 序列的 AIC 直放站,且将重定时技术引入到 DLMS 滤波器结构变换中,对插入的延时进行重分配,以提高直放站系统的信号处理速率。然后按照 FPGA 系统级设计的步骤,在 Simulink 平台上搭建了 AIC 系统,接着详细介绍了自适应干扰抵消的硬件设计,利用 System Generator 生成了可执行的硬件代码。考虑到硬件资源的消耗,将折叠技术应用到自适应滤波器以进行硬件复用,节省硬件资源。最后在实际硬件平台上对本文设计进行了测试。测试结果表明,本设计中直放站自激消除度约等于 30dB, EVM 值为 9.23%,采用重定时技术后,系统处理速率从 26.190MHz 提高到 120.063MHz,而采用折叠技术后,明显减少了系统硬件资源的消耗。

**关键词:** 自适应干扰抵消; DLMS; 重定时; System Generator; 折叠复用

厦门大学博硕士论文摘要库

## Abstract

As wireless communication technology developing, for the good characteristics of low-input, low operating cost, relatively short construction period and good network quality, the repeater, as an effective radio signal transmission and amplification device, has been widely used to expand the networks and fill the blind area. However, the feedback oscillation is always a weakness in engineering application for repeater. In this paper, adaptive interference cancellation technology is implemented in WCDMA repeater to cancel the inherent co-channel interference.

Firstly, some common adaptive algorithms are introduced in this thesis, and then the performances of different algorithms are compared by MATLAB software. Considering the need of convergence performance, the computation complexity of adaptive algorithms, and processing speed, DLMS algorithm is chosen as the adaptive algorithm in this thesis. Secondly, an adaptive interference cancellation repeater based on CAZAC sequence is introduced detailedly, and retiming technique is used to the DLMS filter to improve the processing rate of the interference cancellation system for FPGA implementation. Thirdly, based on the method of FPGA system-level design, simulation platform of interference cancellation repeater is built, then hardware design of adaptive interference cancellation is introduced, and executable hardware codes are generated by System Generator. Considering the hardware cost, folding technique is also used to the adaptive filter to save hardware resources. Finally, the interference cancellation system is verified on the hardware platform. The results show that, when the signal-to-interference ratio is about -15dB, the performance of the repeater is still very good and EVM is about 9.23%, and the processing rate increases from 26.190MHz to 120.063MHz after retiming. Comparison of hardware cost also indicates that the number of DSPs used decreases by nearly 60% after folding.

**KEY WORDS:** Adaptive interference cancellation; DLMS Filter; Retiming; System Generator; Folding

厦门大学博硕士论文摘要库

## 目 录

摘 要.....	I
Abstract.....	III
目 录.....	V
Contents .....	VII
第一章 绪论.....	1
1.1 课题研究背景及意义.....	1
1.1.1 WCDMA 直放站系统的干扰 .....	1
1.1.2 干扰抵消直放站介绍.....	2
1.2 国内外研究现状.....	3
1.3 本文主要工作及组织结构.....	4
第二章 自适应干扰抵消算法 .....	6
2.1 自适应干扰抵消基本原理.....	6
2.2 时域干扰抵消算法 .....	8
2.2.1 LMS 算法 .....	8
2.2.2 DLMS 算法 .....	10
2.2.3 RLS 算法 .....	12
2.3 变换域和子带自适应算法.....	13
2.3.1 变换域 LMS 算法.....	14
2.3.2 子带 LMS 算法.....	16
2.4 MATLAB 性能仿真.....	19
2.5 本章小结 .....	20
第三章 基于 CAZAC 序列的干扰抵消直放站.....	21
3.1 CAZAC 序列.....	21
3.1.1 CAZAC 序列定义 .....	21
3.1.2 CAZAC 序列性质 .....	22
3.1.3 CAZAC 序列研究现状 .....	22
3.2 基于 CAZAC 的 AIC 直放站系统介绍 .....	23
3.3 自适应干扰抵消模块.....	24
3.3.1 干扰抵消参考信号的引入.....	25



3.3.2	DLMS 滤波器结构改进 .....	26
<b>3.4</b>	<b>基于 CAZAC 的 AIC 直放站性能仿真 .....</b>	<b>31</b>
3.4.1	系统仿真结构.....	31
3.4.2	系统性能指标.....	33
3.4.3	系统仿真结果.....	34
<b>3.5</b>	<b>本章小结 .....</b>	<b>39</b>
<b>第四章</b>	<b>自适应干扰抵消的 FPGA 设计 .....</b>	<b>41</b>
<b>4.1</b>	<b>系统硬件平台简介 .....</b>	<b>41</b>
4.1.1	主要模块介绍.....	42
<b>4.2</b>	<b>FPGA 系统级设计简介 .....</b>	<b>44</b>
<b>4.3</b>	<b>干扰抵消模块定点的仿真 .....</b>	<b>46</b>
<b>4.4</b>	<b>干扰抵消滤波器硬件复用 .....</b>	<b>48</b>
4.4.1	折叠技术介绍.....	48
4.4.2	应用折叠后的硬件模型.....	49
<b>4.5</b>	<b>干扰抵消 System Generator 模块设计 .....</b>	<b>51</b>
4.5.1	数字上下变频模块.....	51
4.5.2	自适应干扰抵消模块.....	53
4.5.3	System Generator 平台仿真结果 .....	55
4.5.4	System Generator 综合硬件仿真 .....	57
<b>4.6</b>	<b>本章小结 .....</b>	<b>58</b>
<b>第五章</b>	<b>WCDMA 干扰抵消直放站测试结果及分析.....</b>	<b>59</b>
<b>5.1</b>	<b>实际测试平台介绍.....</b>	<b>59</b>
<b>5.2</b>	<b>硬件测试指标 .....</b>	<b>60</b>
5.2.1	自激消除度.....	61
5.2.2	EVM.....	62
5.2.3	硬件资源消耗.....	62
<b>5.3</b>	<b>本章小结 .....</b>	<b>64</b>
<b>第六章</b>	<b>总结与展望 .....</b>	<b>65</b>
<b>6.1</b>	<b>本文总结及创新 .....</b>	<b>65</b>
<b>6.2</b>	<b>后期工作展望 .....</b>	<b>66</b>
	<b>参考文献.....</b>	<b>67</b>
	<b>致    谢.....</b>	<b>71</b>
	<b>攻读硕士学位期间发表的论文及所做工作 .....</b>	<b>73</b>

## Contents

<b>Abstract in Chinese.....</b>	<b>I</b>
<b>Abstract in English .....</b>	<b>III</b>
<b>Contents in Chinese .....</b>	<b>V</b>
<b>Contents in English.....</b>	<b>VII</b>
<b>Chapter1 Preface .....</b>	<b>1</b>
<b>1.1 Research Background and Meaning.....</b>	<b>1</b>
1.1.1 Interference analysis in WCDMA repeater.....	1
1.1.2 Introduction of AIC repeater.....	2
<b>1.2 Research Status.....</b>	<b>3</b>
<b>1.3 Dissertation Structure .....</b>	<b>4</b>
<b>Chapter2 AIC Algorithm.....</b>	<b>6</b>
<b>2.1 The Theory of AIC.....</b>	<b>6</b>
<b>2.2 Time Domain AIC Algorithm.....</b>	<b>8</b>
2.2.1 LMS algorithm.....	8
2.2.2 DLMS algorithm.....	10
2.2.3 RLS algorithm.....	12
<b>2.3 Transform Domain and Subband AIC Algorithm.....</b>	<b>13</b>
2.3.1 Transform domain LMS algorithm.....	14
2.3.2 Subband LMS algorithm.....	16
<b>2.4 Performance Simulation by Matlab.....</b>	<b>19</b>
<b>2.5 Summary .....</b>	<b>20</b>
<b>Chapter3 AIC Repeater Based on CAZAC Sequence.....</b>	<b>21</b>
<b>3.1 CAZAC Sequence.....</b>	<b>21</b>
3.1.1 Definition of CAZAC sequence.....	21
3.1.2 Characteristics of CAZAC sequence.....	22
3.1.3 Research status of CAZAC sequence.....	22
<b>3.2 Introduction of AIC Repeater Based on CAZAC Sequence.....</b>	<b>23</b>
<b>3.3 Adaptive Interference Cancellation Module.....</b>	<b>24</b>
3.3.1 Introduction of the reference signal.....	25

3.3.2	The improved DLMS filter architecture.....	26
<b>3.4</b>	<b>Performance Simulation of AIC Repeater .....</b>	<b>31</b>
3.4.1	System simulation model.....	31
3.4.2	System performance indicators.....	33
3.4.3	System simulation results.....	34
<b>3.5</b>	<b>Summary .....</b>	<b>39</b>
<b>Chapter4</b>	<b>FPGA Implementation and Design of AIC .....</b>	<b>41</b>
<b>4.1</b>	<b>Introduction of Hardware Platform .....</b>	<b>41</b>
4.1.1	Main modules introduce.....	42
<b>4.2</b>	<b>FPGA System-Level Design.....</b>	<b>44</b>
<b>4.3</b>	<b>Fixed Point Simulation of AIC Module .....</b>	<b>46</b>
<b>4.4</b>	<b>Hardsharing of Adaptive Filter.....</b>	<b>48</b>
4.4.1	Folding.....	48
4.4.2	The improved hardware model.....	49
<b>4.5</b>	<b>Design of AIC Module by System Generator.....</b>	<b>51</b>
4.5.1	DDC and DUC modules.....	51
4.5.2	AIC module.....	53
4.5.3	System Generator simulation results.....	55
4.5.4	System Generator hardware simulation.....	57
<b>4.6</b>	<b>Summary.....</b>	<b>58</b>
<b>Chapter5</b>	<b>WCDMA AIC Repeater Test and Analysis.....</b>	<b>59</b>
<b>5.1</b>	<b>Test Platform Introduce.....</b>	<b>59</b>
<b>5.2</b>	<b>Hardware Test Indicators .....</b>	<b>60</b>
5.2.1	Interference cancellation capacity.....	61
5.2.2	Error vector magnitude.....	62
5.2.3	Resource utilization summary.....	62
<b>5.3</b>	<b>Summary.....</b>	<b>64</b>
<b>Chapter6</b>	<b>Conclusion and Prospect.....</b>	<b>65</b>
<b>6.1</b>	<b>Summary of this Dissertation and Contribution .....</b>	<b>65</b>
<b>6.2</b>	<b>Future Work.....</b>	<b>66</b>
	<b>Reference.....</b>	<b>67</b>
	<b>Acknowledgement.....</b>	<b>71</b>
	<b>Published Paper and Research during Pursuing Master Degree.....</b>	<b>73</b>

## 第一章 绪论

### 1.1 课题研究背景及意义

2009 年 1 月 7 日, 中国正式发布第三代移动通信经营牌照。中国移动获得的是基于 TD-SCDMA 技术制式的 3G 牌照, 中国联通获得的是基于 WCDMA 技术制式的 3G 牌照, 中国电信获得了基于 CDMA2000 技术制式的 3G 牌照, 此举标志着我国正式进入 3G 时代。

WCDMA 是第三代移动通信系统的标准之一, 起源于欧洲和日本的早期第三代无线技术研究<sup>[1]</sup>。1998 年 12 月成立的 3GPP 组织极大推动了 WCDMA 技术的发展, 加快了 WCDMA 的标准化进程, 并最终使 WCDMA 成为 ITU 批准的国际通信标准之一。该标准以 CDMA 技术为核心, 包括了 WCDMA-FDD/TDD 和 TD-SCDMA 三个标准。值得一提的是, TD-SCDMA 技术规范是我国第一个被国际电信联盟全套采纳的无线通信标准。

直放站<sup>[2]</sup> (也称为中继器) 属于同频放大设备, 指的是在无线通信传输过程中用于增强信号的一种无线电发射中转设备, 其本质是一个射频信号功率增强器。直放站的工作原理分为上行链路和下行链路。在下行链路中, 由施主天线在现有的覆盖区域中提取信号, 通过带通滤波器隔离通带外信号, 随后将滤波后的信号经功放放大后再次发射到待覆盖区域; 在上行链路中, 覆盖区域内的移动台手机的信号以同样的工作方式由上行放大链路处理后发射到相应基站, 从而达到基站与手机间的信号传递。直放站由于具有低投入、低成本、建设周期较短和网络质量较好的优点, 已经被广泛用于 2G/3G 网络中的扩展覆盖区和填补信号弱区盲区。

#### 1.1.1 WCDMA 直放站系统的干扰

直放站在安装应用时, 如果收发天线间隔离度不够, 整机增益偏大时, 输出信号经延时后反馈到输入端, 会使直放站输出信号发生严重失真, 从而造成直放站自激<sup>[3]</sup>。在 WCDMA 系统中的同频直放站中, 为了减小产品体积, 收发

天线常常放置在一起（或距离很近），只存在天线方向角的不同，因此直放站的接收天线肯定会接收到其转发天线所发送的经过放大的信号，而对所期望接收的有用信号产生干扰。如果对干扰信号不进行有效处理，干扰和期望信号叠加后的信号会再次被送进功放，再进行放大转发，干扰信号强度会一直累积，最终使得直放站不能正常工作<sup>[4]</sup>。这种正反馈式干扰（干扰信号与正常通信信号的调制参数和载波频率是完全一致的，使得接收机收到叠加有同频干扰的混合信号）还会对数字通信产生严重的电磁干扰，从而阻碍正常的通信。

干扰抵消是同频直放站所必备的一项技术，也是信号处理领域一个非常重要的课题。传统上，克服直放站自激现象的方法主要有<sup>[1][5][6]</sup>：

- 借助建筑物，阻挡在发射天线和接收天线间；
- 微调发射天线和接收天线间的方向角和倾角；
- 降低直放站的增益，就是上下行链路平衡，直至消除自激；
- 增加直放站的施主和重发天线的空间隔离度。垂直隔离度一般最好大于 1 米，水平隔离度可以在十几米以上；如果没有垂直隔离的话，那么水平隔离的距离几乎达到 200 米。

虽然上述办法都可以在一定程度上降低干扰的影响，但是在某些场合，受到环境或系统性能的要求，这些方法并不可行。并且，直放站的天线以及安装要求，使得直放站整体应用成本增加，直接限制了无线直放站的广泛应用。因此，为了降低无线直放站应用中隔离度的要求，必须向无线直放站系统中引入干扰抵消机制，消除直放站系统中因隔离度不足产生的反馈干扰。

### 1.1.2 干扰抵消直放站介绍

AIC(Adaptive Interference Cancellation)直放站关键技术包括高速率 AD/DA 技术、基于软件无线电思想的数字中频技术、基于现代数字信号处理技术的自适应滤波器设计、统一的数字中频硬件平台，适用于各种通信制式，比如 GSM、CDMA、CDMA2000、WCDMA 等<sup>[7]</sup>。AIC 直放站采用数字处理技术，从无线接收信号中检测出空间反馈等干扰信号并抵消，从而消除自激和干扰，在提高系统增益的同时，降低了设备对隔离度的要求，其性能和功能满足常规无线直放站的标准。由于采用数字处理技术，可以在 AIC 直放站下行方向采用 DPD

技术来提高下行功放效率，从而提高整个直放站系统设备的电源效率，有效节约能源；在直放站上行方向可以采用静噪技术，根据用户的有无来决定上行信号是否开启，从而有效地降低了设备引入基站系统的噪声，在不影响基站容量的情况下可以有效地加大覆盖范围。此外，干扰抵消技术的使用，使得设备安装时将不再受制于天线隔离度的要求，收发天线可以使用一根抱杆，天馈安装简单、占地小、物业协调方便。

AIC 直放站相对于其它无线直放站来说，具有如下优点<sup>[8]</sup>：

- 允许增益比隔离度大 15dB 以上，即反馈干扰信号可以比基站信号大 15dB 以上；
- 在相同天线隔离度条件下，可以实现更大的增益以及输出；
- 没有远端设备（靠近基站一侧），减少了故障发生的概率；
- 工作在同一频段，节约频率资源；
- 对天线的隔离度要求降低，使得工程安装更为简便。

## 1.2 国内外研究现状

随着集成电路的发展以及 FPGA 芯片、DSP 器件的广泛应用，直放站干扰抵消技术的研究也从模拟域转向数字域<sup>[9][10]</sup>。通过对国内外相关文献的调研可以发现，直放站干扰抵消技术的研究总体上分以下两类：

- (1) 以算法仿真为目标的直放站干扰抵消的研究，其特点是：主要采用了最小均方误差(LMS)算法，变步长 LMS 算法，或者是归一化的最小均方误差(NLMS)及变换域 LMS 算法，硬件实现较少涉及。例如，文献[11]至[13]中都是对基于 LMS 算法的 AIC 直放站的研究，研究结果表明 LMS 能较好地满足系统要求；文献[14][15]对基于 NLMS 算法的 AIC 直放站进行研究，采用查找表的方法来代替算法中的除法操作，大大减少资源量；文献[15]还对基于频域 LMS 算法的 AIC 直放站进行了详细研究及实现，可以看出，在自适应滤波器阶数要求较多时，频域 LMS 算法相比 LMS 算法，能有效降低复杂度，收敛速率也更快。另外，文献[16][17]中还对基于变步长自适应算法和最陡下降算法的 AIC 算法进行了研究。
- (2) 通过降低算法复杂度来实现直放站干扰抵消的研究，其方法有：一是将时

域 LMS 算法改进为在变换域实现；二是在多载波宽带信号的环境下，通过对自适应干扰抵消模块前后加入输入/输出滤波器将多载波宽带信号划分为窄带信号，然后依次进行自适应干扰抵消后再合成为宽带信号。例如，文献[15]对基于频域 LMS 算法的 AIC 直放站的研究中，就是利用变换域的思想来降低算法复杂度，从而达到提高系统性能的效果。文献[18]至[20]中都是先利用滤波器将多载波信号分为多个单载波信号，然后对各个载波分别进行干扰抵消处理，再将处理后得到的信号滤波后合并为多载波形式。由于前后滤波器将占用系统很大部分的资源消耗，因此文献中分别采用了不同的方案对前后滤波器进行了降低资源消耗的设计，从而减少了整个干扰抵消系统的资源耗用量。

- (3) 综合以上分析可知，国内外现有的关于直放站下 AIC 的研究主要是从对算法改进的角度来实现干扰抵消功能并寻求复杂度的减小，而对自适应干扰抵消系统的信号处理速率没有做太多的研究。因此，本文希望从优化自适应滤波器本身结构的角度来实现自适应干扰抵消，并采用数字信号处理技术来实现干扰抵消系统性能与硬件资源消耗之间的最优折中。另外，作为对直放站干扰抵消时的信道估计，本文还将对基于 CAZAC 伪码的 AIC 直放站进行研究。

### 1.3 本文主要工作及组织结构

本文主要是围绕 WCDMA 直放站干扰抵消技术的实现来进行研究。论文的主体部分总共六章，各章的内容安排如下：

第一章为绪论，主要概述了本文的研究背景及意义，并对国内外研究现状进行了简介，最后简要介绍了本文的主要工作和组织结构。

第二章介绍了自适应干扰抵消的基本原理，并列举出几种常用的自适应干扰抵消算法；然后通过 Matlab 仿真对算法的性能进行评估，确定出适合本文研究所选用的自适应干扰抵消算法。

第三章首先介绍了 CAZAC 序列的定义、性质及研究现状；然后对基于 CAZAC 的 AIC 直放站进行了详细研究；随后讨论了本文仿真时干扰信号的引入方法和重定时技术的实现；最后对 AIC 直放站性能进行了仿真分析。

第四章首先介绍了自适应干扰抵消系统的硬件平台，并且详细叙述了干扰抵消系统各模块的硬件实现，包括数字上下变频、自适应干扰抵消模块等；然后按照 FPGA 系统级设计的步骤，对系统模型进行定点及仿真；同时，为了节省硬件资源，将折叠技术引入到 TF-RDLMS 滤波器，通过优化滤波器的反馈回路延时，采用折叠因子为 4，得到一种新型滤波器结构。

第五章首先给出了实际直放站测试平台及各模块参数说明，然后对设计方案的性能指标进行了软件仿真测试和硬件实物测试，包括频谱、EVM 值、硬件资源消耗等性能指标。

第六章，总结本文工作，归纳本文创新之处，同时对后续工作进行展望。



Degree papers are in the "[Xiamen University Electronic Theses and Dissertations Database](#)". Full texts are available in the following ways:

1. If your library is a CALIS member libraries, please log on <http://etd.calis.edu.cn/> and submit requests online, or consult the interlibrary loan department in your library.
2. For users of non-CALIS member libraries, please mail to [etd@xmu.edu.cn](mailto:etd@xmu.edu.cn) for delivery details.

厦门大学博硕士论文摘要库